



**University of
Zurich**^{UZH}

**Zurich Open Repository and
Archive**

University of Zurich
University Library
Strickhofstrasse 39
CH-8057 Zurich
www.zora.uzh.ch

Year: 2016

Evolución y potencial amenaza de lagunas glaciares en La Cordillera de Vilcabamba (Cusco y Apurímac, Perú) entre 1991-2014

Guardamino, Lucía ; Drenkhan, Fabian

Other titles: Evolution and potential threat of glacial lakes in the Cordillera Vilcabamba (Cusco and Apurimac, Peru) between 1991 and 2014

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-137117>

Journal Article

Published Version

Originally published at:

Guardamino, Lucía; Drenkhan, Fabian (2016). Evolución y potencial amenaza de lagunas glaciares en La Cordillera de Vilcabamba (Cusco y Apurímac, Perú) entre 1991-2014. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montana*, 1(1):21-36.

EVOLUCIÓN Y POTENCIAL AMENAZA DE LAGUNAS GLACIARES EN LA CORDILLERA DE VILCABAMBA (CUSCO Y APURÍMAC, PERÚ) ENTRE 1991 Y 2014

Evolution and Potential Threat of Glacial Lakes in the Cordillera Vilcabamba (Cusco and Apurimac, Peru) between 1991 and 2014

Lucía Guardamino¹ (a20081066@pucp.pe) y Fabian Drenkhan^{1,2}

¹Geografía y Medio Ambiente, Departamento de Humanidades, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú

²Eclim research group, Departamento de Geografía, Universidad de Zúrich, Zúrich, Suiza

RESUMEN

En las últimas décadas, los glaciares de diferentes regiones montañosas han experimentado un retroceso sin precedentes desde finales de la Pequeña Edad de Hielo (LIA). Este proceso contribuye a la formación y crecimiento de lagunas glaciares, que en conjunto con otros componentes de potencial amenaza pueden generar condiciones más frecuentes y aptas para la ocurrencia de un desastre, como flujos por el desborde violento de una laguna glaciar (GLOFs). En los Andes del Perú, varios GLOFs han cobrado un gran número de pérdidas humanas y materiales, pero la colección de datos y la implementación de programas de monitoreo basados en la amenaza son escasos.

Este estudio se centra en cambios de superficies lagunares y glaciares en la poco estudiada Cordillera de Vilcabamba (Cusco y Apurímac, Perú). Presentamos un marco multitemporal y semiautomatizado basado en el Índice Normalizado Diferencial del Agua (NDWI) y el Índice Normalizado Diferencial de la Nieve (NDSI) usando imágenes Landsat TM 5 y OLI 8 en el periodo 1991-2014. Nuestros resultados indican un fuerte retroceso del área glaciar de 51% entre 1991 (201.0 km²) y 2014 (98.9 km²). En el mismo periodo, el número de lagunas (superficie lagunar total) se ha incrementado de 247 (4.1 km²) en 1991 a 329 (5.2 km²) en el año 2014 lo cual corresponde a un crecimiento acelerado de 0.8% (0.6%) de 1991 a 2001 y 2.3% (1.7%) de 2010 a 2014, respectivamente. El mayor crecimiento de lagunas se ha identificado en áreas de altitud elevada (4400-4800 msnm) particularmente durante el último periodo (2010-2014) lo cual podría ser correlacionado a la desglaciación actual y, por ende, a cambios en características geomorfológicas. La discriminación de lagunas y el análisis de potencial amenaza se llevaron a cabo en un protocolo de cuatro etapas, en primer lugar, basado en las variaciones superficiales de lagunas y la posible exposición de centros poblados ante un GLOF aguas abajo. Se aplicó criterios adicionales incluyendo (a) distancia glaciar-laguna, (b) tipo de dique, (c) periodo de formación, (d) pendientes críticas y (e) estimaciones de volumen. Un total de 52 "lagunas indicadores" han sido identificadas, de las cuales 13 lagunas glaciares están en contacto con 15 centros

poblados expuestos aguas abajo. Dos de estas lagunas han sido clasificadas en un nivel de potencial amenaza bajo-mediano y tres en un nivel mediano-alto.

Nuestros resultados tienen diferentes implicancias para la investigación y gestión del agua futuras. El continuo derretimiento glaciar y desarrollo de lagunas generan condiciones potenciales de amenaza y riesgo. Sin embargo, emergen oportunidades para una futura gestión (integrada) del agua considerando la necesidad de nuevos reservorios, p. ej., para la demanda de agua creciente de agricultura e hidroenergía en la región. La metodología presentada facilita un análisis efectivo y extenso de amenaza que debería ser corroborado también con data in situ y criterios adicionales aplicados a otras cordilleras glaciares. Futuros estudios deberían enfocarse en un mayor desarrollo de un análisis detallado, continuo y estandarizado de amenaza y riesgo, y monitoreo de lagunas glaciares.

Palabras clave: Andes tropicales, derretimiento glaciar, aluvión, Cordillera de Vilcabamba, sensoramiento remoto

ABSTRACT

In recent decades, glaciers in different high-mountain regions have experienced unprecedented shrinkage since the end of the Little Ice Age (LIA). This process triggers the formation and growth of glacier lakes, which in combination with other potential hazard components can result in more likely conditions prone to the occurrence of disasters, such as Glacier Lake Outburst Floods (GLOFs). In the Peruvian Andes, multiple GLOFs have caused a large number of human and material losses, but hazard-based data collection and implementation of lake monitoring programs are scarce in this region.

This study focuses on lake and glacier area changes in the little studied Cordillera Vilcabamba (Cusco and Apurimac, Peru). We present a multi-temporal and semi-automatic framework based on the Normalized Difference Water Index (NDWI) and Normalized Difference Snow Index (NDSI), using Landsat TM 5 and OLI 8 images in the period 1991-2014. Our results corroborate a strong glacier area shrinkage of 51% between 1991 (201.0 km²)

and 2014 (98.9 km²). In the same period, the number of lakes (total lake surface) has increased from 247 (4.1 km²) in 1991 to 329 (5.2 km²) in 2014, which corresponds to an accelerated growth of 0.8% (0.6%) from 1991 to 2001 and 2.3% (1.7%) from 2010 to 2014, respectively. The strongest lake growth has been identified in high-altitudinal areas (4400-4800 masl) particularly for the last period (2010-2014), which might be correlated to current deglaciation processes and changes in geomorphologic features. The lake discrimination and potential hazard analysis were performed in a four-step protocol, primarily based on lake surface variations and a possible GLOF exposure of villages downstream. Further criteria were applied, including (a) glacier-lake distance, (b) dam type, (c) formation period, (d) critical slopes and (e) volume estimations. A total of 52 "indicator lakes" have been identified, of which 13 glacier lakes are connected to 15 exposed villages down valley. Two of these lakes have been classified in a low-medium potential hazard level and three in a medium-high level.

Our study results have several implications for future research and water management. Ongoing glacier shrinkage and lake development generate serious hazard and potential risk conditions. Nonetheless, there are opportunities for (integrated) future water management considering the growing need for new reservoirs, for example, for growing agriculture and hydropower water demand in the region. The presented methodology facilitates an effective and extended hazard analysis which should be further corroborated with additional in-situ data and criteria applied to other glaciated mountain ranges. Future research should focus on further development of a comprehensive, continuous and standardized hazard and risk analysis, in connection with glacier lake monitoring.

Keywords: *Tropical Andes, glacier shrinkage, GLOF, Cordillera de Vilcabamba, remote sensing*

INTRODUCCIÓN

En diferentes regiones de alta montaña del mundo se ha registrado un intenso retroceso glaciar en las últimas décadas que ha sido atribuido principalmente a los efectos del cambio climático. Este desarrollo está alterando los regímenes hidrológicos y contribuyendo a una cada vez más rápida formación y crecimiento de lagunas glaciares por el mayor aporte de agua proveniente de los deshielos y la topografía expuesta, como depresiones en el relieve y morrenas, que deja el retroceso glaciar (Haeberli, Schaub y Huggel, 2016; Haeberli et al., 2013; Hegglin y Huggel, 2008; Harrison et al., 2006). Además, la fusión de hielo y permafrost brindan nuevas condiciones de amenaza al dejar depósitos de bloques y detritos sueltos, y cambiar la geometría de las masas glaciares y laderas de roca congeladas, ahora más propensas a la fragmentación y posible caída de bloques de roca y hielo (Haeberli et al., 2013; Haeberli, Schaub y Huggel, 2016).

En este contexto, una amenaza muy inminente es la representada por el flujo por el desborde violento de una laguna glaciar (GLOF, por sus siglas en inglés), las cuales consisten en la súbita descarga de un gran volumen de agua y material de detritos y escombros arrastrados y

transportados valle abajo. Los factores que pueden originar un GLOF son diversos: caídas de avalanchas de nieve, hielo y roca; erosión parcial y/o colapso del dique morrénico; sismos o repentinos aportes significativos de agua debido a intensas lluvias o drenaje de agua de lagunas próximas que se encuentren en altitudes superiores (Haeberli et al., 2013; Bolch et al., 2012).

A nivel global, los desastres naturales de origen glaciar y especialmente los GLOFs han originado eventos catastróficos con importantes pérdidas humanas y materiales (Haeberli et al., 2013; Hoffmann y Weggenmann, 2013; Worni, Huggel y Stoffel, 2012; Booth y Punt, 2012; Jain et al., 2012; Mergili et al., 2012; Bajracharya y Mool, 2009; Harrison et al., 2006). En los Andes del Perú se han registrado repetitivos eventos GLOF en las últimas décadas con consecuencias en algunos casos devastadoras (Carey, 2010; Portocarrero, 2014). Un evento simbólico por la magnitud de su impacto es el GLOF de 1941 en la Cordillera Blanca que mató, de acuerdo a una estimación corregida, a unas 1800 personas en la ciudad de Huaraz (Wegner, 2014).

El siguiente estudio se centra en la Cordillera de Vilcabamba (sur del Perú) en la cual los GLOFs no han alcanzado un impacto tan destructivo como en la Cordillera Blanca; sin embargo, futuros eventos podrían darse con efectos considerables sobre las poblaciones aledañas y la infraestructura. En las escasas investigaciones que existen en la región, se han identificado algunas lagunas glaciares potencialmente peligrosas. Una de ellas es la laguna Sisaypampa, también conocida como laguna Salcantay, ubicada en el río Orcospampa, valle del Aobamba. Pese a que esta laguna está contenida en una depresión de roca granítica, se encuentra rodeada por un terreno escarpado y material morrénico inestable; además, tiene un borde libre pequeño y un volumen potencial máximo de 2.5x10⁶ m³ (Buis, 2014; Huggel, Kääb y Haeberli, 2003; INGEMMET, 1999). Además, en la cuenca del Sacsara, se considera a la laguna Hanpi K'ocha como muy peligrosa. Criterios usados para esta evaluación son su pequeño borde libre (1-5 m), su gran volumen de aproximadamente 4.3x10⁶ m³ y las altas pendientes de las laderas cubiertas de glaciar y con roca expuesta por encima de la laguna (Giráldez et al., 2012). Estos estudios resaltan la necesidad de realizar más estudios incluyendo una evaluación de la potencial amenaza de lagunas de alta montaña y variables sociales.

En ese sentido, el objetivo principal del presente estudio es identificar nuevas lagunas formadas a través de la construcción de un modelo semiautomático que funcione de manera iterativa, y detectar a aquellas que representen un mayor potencial de amenaza definida mediante parámetros de superficie, período de formación, tipo de dique, distancia al glaciar, pendiente de posibles áreas de fallo glaciar y canal de drenaje aguas abajo, y volumen. Nuestro segundo propósito es analizar la evolución de la superficie glaciar y evaluar la importancia del aporte del derretimiento glaciar en la formación y/o crecimiento de lagunas. Adicionalmente, el tercer propósito es identificar centros poblados expuestos con la finalidad de generar recomendaciones para que se realicen futuros estudios en zonas priorizadas con mediciones y monitoreos en las lagunas que puedan representar una mayor amenaza.

ÁREA DE ESTUDIO

La Cordillera de Vilcabamba es un tramo de la Cordillera Oriental Andina que se ubica entre los 13°10' y 13°37' latitud sur, y entre los 72°20' y 73°15' longitud oeste, en las regiones de Cusco y Apurímac al sur del Perú (Figura 1). Se encuentra en un área de transición entre los Andes y la Amazonía (Suarez et al., 2013). Con casi 100 km² representa la tercera región glaciaria más grande del Perú, la cual corresponde al 8% del área glaciaria nacional y 4% del área glaciaria tropical del mundo.

La región de Vilcabamba se encuentra en una situación de combinación de régimen tropical y subtropical. Con temperaturas promedio que oscilan entre 14 °C y 17 °C y una alta variabilidad espacio-temporal de precipitación anual entre 500 mm (partes altas, hacia el sureste al altiplano) y 2000 mm (partes bajas, hacia el noreste a la Amazonía).

Se caracteriza por tener un relieve accidentado y elevado con un rango altitudinal de 800 a 6264 msnm, siendo el nevado Salcantay el pico más elevado (Carlotto et al., 1999). En la microcuenca Aobamba los taludes son muy inclinados y la ocurrencia de un GLOF mediano-grande podría afectar al cauce de toda la cuenca, habiendo material disponible para un nuevo flujo a lo largo de estos taludes y en las faldas del Salcantay (Buis, 2014). Precisamente en la quebrada Aobamba se registró un GLOF el 12 de julio de 1996. La causa más probable fue la caída de masa glaciaria sobre la laguna Sisaypampa en el río Orcospampa, en la vertiente norte del nevado Salcantay. En este evento murieron cinco personas. El 12 de marzo de 1998 y el 22 de

noviembre de 1998 se originaron un nuevos GLOFs en el río Orcospampa con características posiblemente similares al de 1996, la caída de masas glaciares sobre la misma laguna, transportando el material morrénico existente (Carlotto et al., 1999; INGEMMET, 1999).

Los distritos de Vilcabamba y Santa Teresa son los que cubren una mayor extensión de la Cordillera de Vilcabamba. Son distritos de bajos recursos económicos con ingresos familiares mínimos de 181 y 366 Nuevos Soles (aproximadamente 54 y 110 dólares americanos) per cápita, respectivamente (PNUD, 2013). En Santa Teresa, el 70% de los aproximadamente 10,000 habitantes es considerado pobre, el 42% de los niños menores de 5 años indica una malnutrición crónica, el 95% no tiene acceso a agua potable para consumo humano, el 60% no tiene electricidad y el 29% no cuenta con los servicios adecuados de saneamiento (MAXIMIZE, 2011). Dada esta alta vulnerabilidad, un desastre natural, tal como un GLOF, podría constituir un alto riesgo para la población y agravar su subsistencia a largo plazo.

DATOS

Se trabajó con imágenes Landsat TM 5 y OLI 8 (path 004/005, row 069) correspondientes a la época seca de los años 1991, 2001, 2010 y 2014. Se optó trabajar con estas imágenes distribuidas de forma gratuita por la mediana resolución espacial (30 m), temporal (16 días), radiométrica (8-16 bit), disponibilidad histórica (desde 1985) y la amplia cobertura territorial (185 km x 172 km) (NASA, 2016) estableciendo una serie de criterios de selección (Tabla 1).

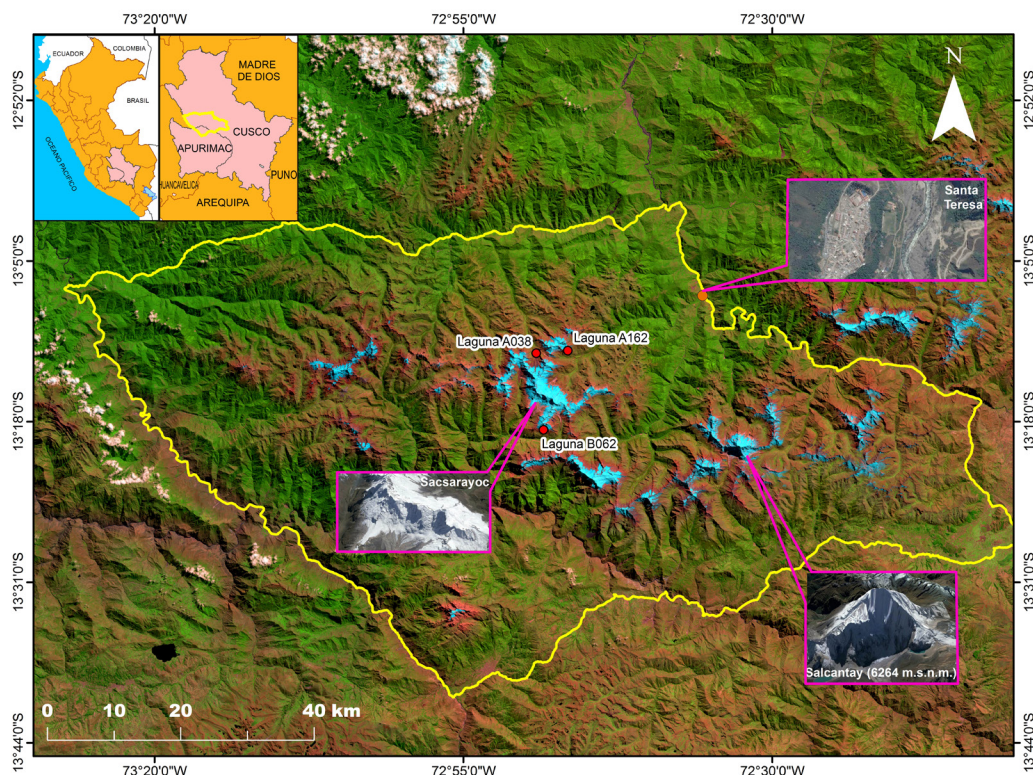


Figura 1: Mapa de ubicación de la Cordillera de Vilcabamba. En color amarillo se encuentra delimitada la extensión de la Cordillera de Vilcabamba (UGRH). También se puede visualizar la ubicación de las lagunas A038, A162 y B062, que son aquellas identificadas con el mayor potencial de amenaza (Tabla 3). Imagen base: Landsat 8 OLI, composición de bandas (7-5-4), mosaico 29.05.2014 y 05.06.2014.

Se emplearon las escenas Landsat TM 5 y OLI 8 originales debido a que el nivel de corrección geométrica que tienen estas imágenes (L1T) no fue superado por el ensayo de ortorrectificación manual aplicando 103 puntos de control de terreno (GCP), ni por el ajuste automático mediante múltiples puntos de enlace (*tie points*) que ofrece

p. ej. el módulo Autosync del programa Erdas Imagine. Un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) fue proporcionado por el producto libremente accesible SRTM (resolución espacial de 90 m), versión 3 corregida con vacíos rellenos (*void-filled*) (USGS, 2013).

CRITERIOS	PROPÓSITO
Escenas correspondientes a la temporada seca: junio- septiembre	Realizar una delimitación precisa de los bordes glaciares, evitando confusión de nieve temporal con hielo glaciar. Menor contenido de humedad y nubosidad en la atmósfera reduce alteraciones en la radiometría de la imagen.
Mínimo porcentaje de cobertura de nubosidad en las escenas	Inferior al 15% en el área estudiada. Se reduce la probabilidad de confusión en la clasificación y revisión automática y manual de las áreas glaciares y lagunares.
Calidad/Nivel de corrección9/L1T	Las escenas cuentan con el mayor nivel de corrección geométrica y radiométrica automáticas.

Tabla 1. Criterios de selección de escenas Landsat TM 5 y OLI 8.

METODOLOGÍA

Delimitación de áreas lagunares y glaciares

El procedimiento general comprendió la identificación de áreas lagunares a través de la construcción de un modelo semiautomático (Figura 2), basado en el Índice Normalizado Diferencial del Agua (NDWI, por sus siglas en inglés). Luego, la remoción de sombras e identificación de lagunas erróneamente clasificadas se realizó a través de un mapa de pendientes e imágenes sombreadas generadas a partir del DEM (Huggel et al., 2002). Este último se realizó dentro del marco de una corrección manual de las áreas lagunares. La información lagunar obtenida para el año 2010 se contrastó con el inventario de lagunas de la ANA (2012a) que se basó en imágenes satelitales de los años 2009 y 2010.

Para discriminar las áreas lagunares de otros tipos de superficie se empleó un cociente de bandas que se basa en el principio de contrastar las bandas con la máxima y mínima reflectancia del agua. Siguiendo la metodología aplicada por Huggel et al. (2002), Frey et al. (2010) y Hanshaw y Bookhagen (2014), se utilizó el índice de bandas NDWI

$$(NIR-B)/(NIR+B)$$

donde *NIR* corresponde al infrarrojo cercano (banda 4 en Landsat 5 y banda 5 en Landsat 8) y *B* corresponde al azul (banda 1 en Landsat 5 y banda 2 en Landsat 8).

Por lo general, las áreas lagunares presentan valores NDWI bajos, oscilando entre -0.60 y -0.85 (Huggel et al., 2002). Sin embargo, en el área de estudio se encontraron valores más altos de reflectividad. El umbral mínimo de las escenas TM 5 se fijó en -0.85 y el máximo en -0.40. Por otra parte, las escenas OLI 8 presentaron valores diferentes para las áreas lagunares, con umbrales incluso más elevados entre -0.13 y +0.04 (Tabla 2). La mayor resolución radiométrica y la mayor resolución espectral (mayor cantidad de bandas con menor anchura) que ofrece Landsat 8 son factores que influyen en los rangos de umbrales diferenciados en relación a las Landsat 5.

Las áreas glaciares fueron identificadas de forma similar. Se aplicó el Índice Normalizado Diferencial de la Nieve (NDSI, por sus siglas en inglés). Seguidamente, se removieron los bordes lagunares clasificados erróneamente como glaciares y se realizaron las correcciones manuales (adicción/remoción de vectores) con el empleo de una imagen de sombras como se describió anteriormente (Hanshaw y Bookhagen, 2014; Silverio y Jaquet, 2005).

No existe un consenso sobre cuáles son las bandas que ofrecen mejores resultados en la identificación de superficies glaciares. Por ello, se recomienda hacer pruebas en la zona de estudio para determinar las bandas óptimas (Hanshaw y Bookhagen, 2014). Estudios realizados sugieren emplear las bandas TM 3/5, 4/5 o 2/5 (Hanshaw y Bookhagen, 2014; Silverio y Jaquet, 2005). En cambio, no se han encontrado estudios que aborden los análisis NDSI

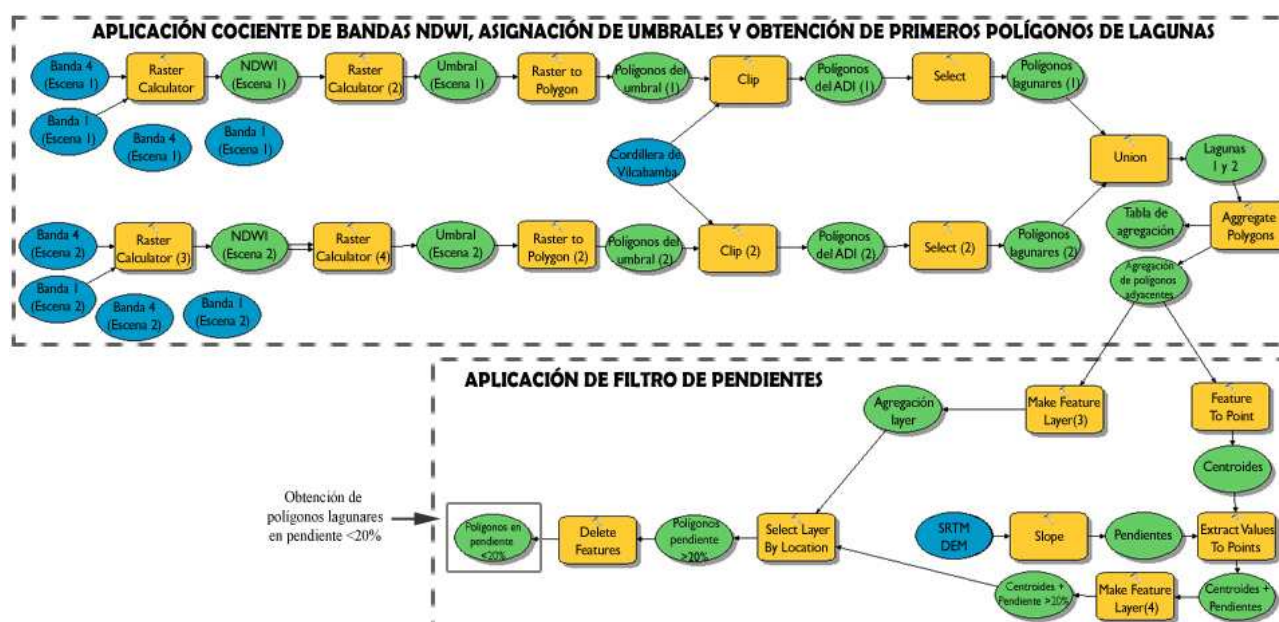


Figura 2: Modelo semiautomático empleado para la delimitación de superficies lagunares, elaborado en ArcGIS 10.1.

ESCENAS LANDSAT	Fecha	Nubosidad (%)	NDWI	NDSI
LT50040691991182CUB00	01/07/1991	10	-0.70 a -0.45	$\geq +0.40$
LT50050691991189CUB00	08/07/1991	0	-0.75 a -0.46	$\geq +0.35$
LT500406920011225CUB02	13/08/2001	14	-0.82 a -0.40	$\geq +0.45$
LT500506920011216CUB02	04/08/2001	21	-0.82 a -0.40	$\geq +0.46$
LT50040692010186CUB00	05/07/2010	10	-0.85 a -0.40	$\geq +0.40$
LT50050692010193CUB00	12/07/2010	19	-0.85 a -0.40	$\geq +0.40$
LC80040692014149LGN00	29/05/2014	12	-0.13 a 0.04	$\geq +0.40$
LC80050692014156LGN00	05/06/2014	12	-0.13 a 0.02	$\geq +0.35$

Tabla 2. Umbrales NDWI/NDSI Landsat TM 5 (1991, 2001 y 2010) y OLI 8 (2014). Nótese que los valores de los píxeles NDWI en las imágenes TM son más bajos que en las OLI. En cambio, los valores de los píxeles NDSI son similares. También se incluye porcentaje de nubosidad de las escenas.

en imágenes Landsat 8. El cociente de bandas NDSI se expresa

$$(G-SWIR)/(G+SWIR)$$

donde G corresponde a la banda verde (banda 2 en Landsat 5 y banda 3 en Landsat 8) y $SWIR$ al infrarrojo cercano de onda corta (banda 5 en Landsat 5 y banda 6 en Landsat 8). Se optó trabajar con las bandas Landsat 5 recomendadas por el estudio de Silverio y Jaquet (2005); mientras que, para la elección de las bandas OLI de Landsat 8 se realizaron ensayos con resultados consistentes para las bandas seleccionadas. Los números digitales de los píxeles correspondientes a las regiones glaciares se establecieron

con un rango de umbral mayor o igual a +0.35, tanto para las escenas TM y OLI (Tabla 2). Los filtros que se aplicaron fueron la eliminación de áreas glaciares superpuestas a las áreas clasificadas como lagunas, seguido de la eliminación automática de los polígonos con superficies inferiores a los $5.4 \times 10^3 \text{ m}^2$ (6 píxeles). Se estableció este umbral para no considerar los fragmentos relativamente pequeños de hielo que no pertenecen al glaciar principal.

Las áreas glaciares se contrastaron con el estudio multitemporal de Suarez et al. (2013) y con el inventario de glaciares (ANA, 2012b) realizado con imágenes Landsat y ASTER de los años 2009 y 2010.

Obtención de parámetros lagunares

A partir de los polígonos de lagunas se derivaron los parámetros de área, período de formación y distancia laguna–glaciar empleando las herramientas de geoprocésamiento del entorno SIG (Sistemas de Información Geográfica). El tipo de dique de las lagunas y la identificación de centros poblados expuestos se determinaron a partir de la visualización directa de imágenes en Google Earth Pro. Se empleó la herramienta perfil de elevación de Google Earth Pro para el cálculo de la pendiente media de las laderas próximas a las lagunas con potencial amenaza media-alta.

Por otro lado, la estimación de la profundidad y volumen de lagunas a partir de imágenes satelitales representa un reto y una necesidad para poder cuantificar el volumen del agua como reservorio de agua potable y ante un eventual desborde. Con este propósito se han desarrollado estudios basados en modelos empíricos para realizar un cálculo aproximado de estos parámetros (Haeberli y Schweizer, 1988; Huggel et al., 2002).

Para la estimación de la profundidad media de las lagunas se aplicó la metodología de parametrización de Haeberli y Schweizer (1988). Para ello, se seleccionaron lagunas con un dique morrénico lateral claramente identificable en Google Earth, luego se realizó el siguiente cálculo

$$z_c = w/(4 \pm 1)$$

donde z_c corresponde al espesor promedio en la línea central de flujo de un glaciar de valle y w , al ancho de hielo.

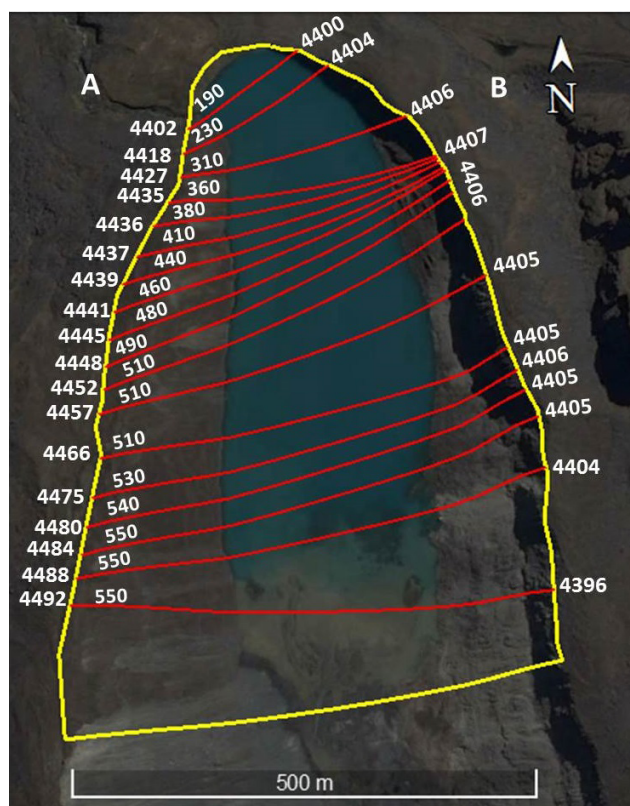


Figura 3. Datos empleados para la estimación de la profundidad de acuerdo a la metodología de Haeberli y Schweizer (1988), aplicado a la laguna A038 (ubicada en la lengua norte del glaciar Sacsarayoc). En amarillo: delimitación de dique morrénico. En rojo: transectos para medir ancho de hielo (“w” en metros) sobre cada transecto. A: altitud absoluta del dique en ambos extremos del transecto. B: altitud media absoluta del espejo de agua en el recorrido del transecto. Fuente: Imagen Astrium, Google Earth Pro.

El z_c está definido por un valor empírico de 3 a 5, donde 3 representa al valor límite de la profundidad máxima de la antigua lengua glaciar y laguna, hoy en día probablemente mayor debido al proceso de sedimentación del cuerpo acuático. El proceso de obtención de w se muestra con detalle en la Figura 3.

El espesor promedio en la línea central de flujo se sustrajo a la diferencia entre las altitudes absolutas del borde superior del dique (límite superior de la lengua glaciar anterior) y el espejo de agua actual, obteniendo la profundidad de la laguna. El volumen de estas lagunas se estimó a partir de los datos de profundidad y área.

Otra alternativa para la estimación de la profundidad y el volumen ha sido descrita por Huggel et al. (2002). A partir de la data in situ sobre área lagunar, volumen y profundidades se estableció una relación empírica entre la profundidad y el área

$$D = 0.104 A^{0.42}$$

donde D corresponde a la profundidad y A al área.

La precisión de los resultados es discutible (véase la sección de “Evaluación de parámetros y análisis de la amenaza” abajo). Cook y Quincey (2015) analizan la aplicación de la fórmula de manera genérica hallando un coeficiente de determinación bajo ($r^2 = 0.38$) que indica una alta variabilidad y por ende dispersión significativa de los cálculos hallados mediante esta técnica de escalado.

Análisis de la potencial amenaza de lagunas y centros poblados expuestos

Para estimar la potencial amenaza de lagunas, múltiples parámetros referidos a su geometría, material, volumen y ubicación deben ser tomados en cuenta (Bolch et al., 2012; Huggel et al., 2002). Sin embargo, dentro de la metodología semiautomática presentada en este estudio, se plantea una clasificación de la potencial amenaza de lagunas basada en la variación de la superficie como parámetro con mayor grado de definición a partir del sensoramiento remoto, a la cual sigue un análisis más detallado con otros parámetros (Tabla 3).

En una primera etapa se identificaron las lagunas existentes en los años 1991-2014 y los cambios de superficie de cada laguna. La segunda etapa consistió en discriminar lagunas indicadores (lagunas con un umbral de crecimiento mínimo) de las (aquí denominadas) lagunas residuales. En esta etapa fueron establecidos criterios de cambio relativo, cambio absoluto y formación de nuevas lagunas con una extensión mínima (Tabla 3).

Dado que las lagunas indicadores pueden representar un potencial de amenaza, en la tercera etapa se analizaron las conexiones existentes entre estas lagunas y los centros poblados expuestos. Mediante Google Earth Pro se visualizó la orientación de las laderas y las posibles rutas de recorrido de flujos aluviónicos, detectándose centros poblados que se ubican aguas abajo de estas lagunas. Asimismo, esta información se corroboró con un estudio desarrollado por Buis (2014), en el que se incluyeron modelamientos de flujos aluviónicos en el distrito de Santa Teresa (Tabla 3). De esta manera, se identificaron las lagunas que tenían un nivel de conexión con centros poblados, al encontrarse al

Etapa	Objetivo	Parámetro	Criterios	Observaciones	Cuento
1	Detección semi-automática de lagunas en el Vilcabamba		NDWI DEM (SRTM) Sombreado Área mínima (1píxel/900 m ²) para detección de lagunas	Identificar lagunas existentes en los años 1991, 2001, 2010 y 2014.	329 (año base 2014)
2	Lagunas indicadores	Área	Cambio relativo ¹ ($\geq 100\%$) Cambio absoluto ($\geq 5.4 \times 10^3 \text{ m}^2$) Nuevas lagunas ² ($\geq 5.4 \times 10^3 \text{ m}^2$)	Lagunas por encima de los umbrales de crecimiento establecidos en los criterios.	52
3	Centros poblados expuestos (CP)	Conexión laguna-CP	Orientación de pendientes con cabeceras de cuenca integradas por lagunas indicadores.	CP ubicados en el interior de quebradas o en el cono de deyección.	13
4	Lagunas potencial amenaza baja-mediana	Área	Cambio absoluto ($>5.4 - \leq 20.0 \times 10^3 \text{ m}^2$)	Lagunas con crecimiento medio	2
		Distancia laguna-glaciar	$\leq 500 \text{ m}$		
		Tipo de dique	Morrénico, rocoso o mixto.		
		Período de formación	A partir del 2001	Nueva laguna con crecimiento medio ($> 5.4 - \leq 20.0 \times 10^3 \text{ m}^2$)	
	Lagunas potencial amenaza mediana-alta	Área	Cambio absoluto ($>20.0 \times 10^3 \text{ m}^2$)	Lagunas de mayor crecimiento.	3
		Distancia laguna-glaciar	$\leq 100 \text{ m}$		
		Tipo de dique	Morrénico		
		Pendiente crítica del canal de avalancha	$\geq 11^\circ$	Pendiente media del canal de avalancha glaciar-laguna	
		Pendiente crítica del área de desprendimiento de rocas/glaciares	$\geq 20^\circ$	Pendiente media de laderas con hielo y/o roca	
		Período de formación	A partir del 2001	Nueva laguna con crecimiento acelerado ($>20.0 \times 10^3 \text{ m}^2$).	
		Volumen (a partir de la profundidad y área)	$\geq 2.00 \times 10^6 \text{ m}^3$	Escalado empírico (Huggel et al. 2002)	
			$\geq 2.00 \times 10^6 \text{ m}^3$	Parametrización empírica (Haeberli y Schweizer 1988)	

Tabla 3. Criterios para identificar lagunas indicadores, las que representan una potencial amenaza baja-media y mediana-alta, y centros poblados expuestos.

¹ Lagunas que luego de haber incrementado su superficie ($\geq 100\%$). Su extensión al año 2014 es igual o superior a los $5.4 \times 10^3 \text{ m}^2$.

² Son las nuevas lagunas formadas en el período 2010-2014, con una extensión superior a $5.4 \times 10^3 \text{ m}^2$.

interior de quebradas, valles y conos de deyección. Estas lagunas pasaron a la última fase del análisis, la etapa 4.

En la etapa 4 se derivaron las lagunas con potencial amenaza baja-mediana y mediana-alta. En ambos casos se definieron criterios de incremento de superficie mínimos: para un potencial de amenaza baja-mediana de $>5.4 \times 10^3 \text{ m}^2$ a $\leq 20.0 \times 10^3 \text{ m}^2$, y para determinar un potencial de amenaza mediana-alta $>20.0 \times 10^3 \text{ m}^2$. Las lagunas con potencial amenaza baja-mediana cumplieron con un umbral de distancia al glaciar. Además, se incluyeron otros parámetros como tipo de dique y período de formación reciente como criterios adicionales pero no excluyentes (Tabla 3).

La identificación de lagunas con potencial amenaza mediana-alta requirió de una evaluación más profunda que incorporó parámetros adicionales centrados en pendientes críticas y volumen de agua (Tabla 3).

RESULTADOS

Evolución de la cobertura glaciar

El área glaciar de la Cordillera de Vilcabamba se ha reducido en un 51% entre 1991 y 2014. Nuestros resultados indican que en 1991 el área glaciar era de 201 km^2 , reduciéndose a 144.9 km^2 , 108.4 km^2 y 98.9 km^2

en los años 2001, 2010 y 2014, respectivamente. La tasa de reducción anual del área glaciaria fue de 2.5% en los periodos 1991-2001 y 2001-2010, desacelerándose a un 1.8% en el periodo 2010-2014 estando todavía por encima del promedio nacional anual de aproximadamente 1.1% (ANA, 2014)

El retroceso glaciario registrado en la Cordillera de Vilcabamba concuerda con los cambios observados en los glaciares de casi todas partes del mundo, y a nivel regional en los Andes Tropicales (ANA, 2014; Hanshaw y Bookhagen, 2014; Salzmann et al., 2013; Vuille et al., 2008b; Silverio y Jaquet, 2005; Kaser y Osmaston, 2002). Los estudios realizados en los Andes Tropicales indican que el ascenso de la temperatura 0.13 °C/década registrado entre 1950-2010 es la principal causa del retroceso glaciario (Vuille et al., 2015). Aunque también señalan que otros posibles factores influyentes son el incremento de la humedad y cambios en patrones de la precipitación y la cobertura de nubes así como la ocurrencia de eventos El Niño fuertes en las últimas décadas (1982/83, 1997/98 y finalmente 2015/16, el último todavía sin mayores estudios) (Rabatel et al., 2013; Vuille, Kaser y Juen, 2008a).

En estudios previos en la Cordillera de Vilcabamba, Suarez et al. (2013) concluyeron que entre 1991 y 2011 el área glaciaria se redujo de 220.30 km² a 129.40 km² (pérdida total de 41% correspondiente a un promedio de 2.1% / año); mientras que, en el inventario elaborado por la ANA (2012b) se obtuvo una superficie de 129.15 km² para el 2009.

Nuestros hallazgos y los obtenidos por Suarez et al. (2013) evidencian una disminución de la cobertura glaciaria, aunque existen diferencias entre los años y estimaciones de las extensiones glaciares en los tres estudios. Esto se debe posiblemente, entre otros, a los criterios y umbrales

asumidos para la clasificación, particularmente la selección del umbral y edición manual para definir las áreas glaciares, las condiciones atmosféricas en las imágenes, y confusiones restantes en la clasificación con sombras.

Evolución de la cobertura y cantidad de lagunas

El mapeo de lagunas señala un incremento del número y área de lagunas. La cantidad (superficie) de lagunas que se identificaron para cada año fueron 247 (4.1 km²), 268 (4.3 km²), 295 (4.8 km²) y 329 (5.2 km²) correspondientes, en ese orden, a los años 1991, 2001, 2010 y 2014. Además, la tasa anual de formación de nuevas lagunas se ha acelerado en el último periodo de 0.8% (1991-2001) a 2.3% (2010-2014). Asimismo, ha habido un incremento anual sostenido de la superficie lagunar de 0.6% (1991-2001) a 1.7% (2010-2014).

El mayor número de lagunas en casi todos los años de estudio se ubican en el rango altitudinal de 4000 a 4400 msnm; a excepción del último periodo donde el número de lagunas entre los 4400 y 4800 msnm (145) superó al número de lagunas que se encontraban entre los 4000 y 4400 msnm (Figura 4). Esto se debe a que el 61% (50) de las nuevas lagunas que se han formado en el periodo total del estudio entre 1991 y 2014, se encuentran entre los 4400 y 4800 msnm; mientras que, un 28% (23) entre los 4000 y 4400 msnm (Tabla 4). Además, el 79% de estas lagunas recién formadas son principalmente pequeñas con una superficie igual o inferior a los 5.0x10³ m². Cabe mencionar que también existen nuevas lagunas con tamaño significativo, en total siete lagunas con una superficie superior a los 15.0x10³ m², de las cuales cinco se han formado en el rango de 4400 a 4800 msnm, y una entre los 4800 y 5200 msnm (Tabla 4).

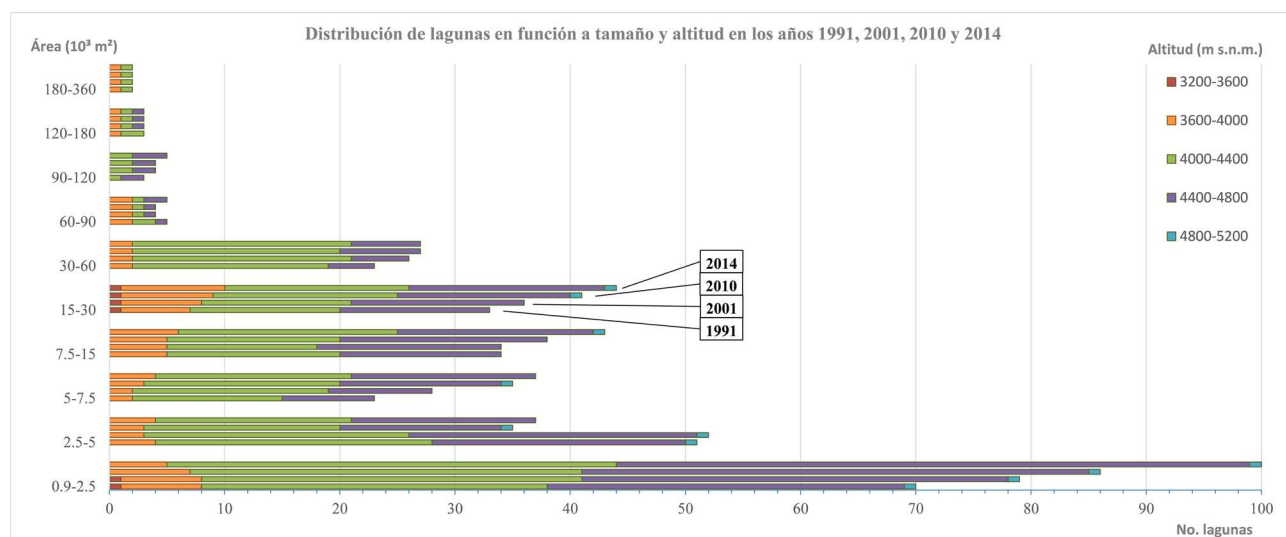


Figura 4: Número de lagunas de acuerdo a rangos de superficie y altitud entre 1991-2014. Cada clase de área lagunar (cuatro barras horizontales) corresponde, desde abajo hacia arriba, a los años 1991, 2001, 2010 y 2014.

Área (10 ³ m ²) / Altitud (msnm)	0.9-2.5	2.5-5.0	5.0-7.5	7.5-15.0	15.0-30.0	30.0-60.0	60.0-90.0	90.0-120.0	Total
4800-5200	1	2	0	1	1	0	0	0	5
4400-4800	34	5	5	1	2	1	1	1	50
4000-4400	18	3	0	1	1	0	0	0	23
3600-4000	2	0	0	2	0	0	0	0	4
Total	55	10	5	5	4	1	1	1	82

Tabla 4: Distribución de nuevas lagunas por rangos de altitud y superficie determinadas entre 1991-2014.

Nuestros cálculos de cantidad y superficie de lagunas del año 2010 se aproximan a las estimaciones realizadas en el Inventario Nacional de Lagunas (ANA, 2012a), principalmente, en referencia a la cantidad de lagunas. En base a información satelital de los años 2009 y 2010, en este inventario, se registraron 284 lagunas y una superficie de 5.0 km². El mayor rango de diferencia entre los cálculos de superficie se debe posiblemente a las superficies mínimas de digitalización establecidas en cada estudio (200 m² en el inventario y 900 m² en el presente estudio). Además depende, entre otros, de las diferentes metodologías en la aplicación del NDWI, alteraciones radiométricas en las imágenes multitemporales y confusiones relacionadas (véase arriba) a las características atmosféricas y presencia de sombras en las escenas.

La formación de nuevas lagunas a mayores altitudes, principalmente entre los 4400-4800 msnm (Tabla 4) sugiere que el aporte del deshielo ha sido un factor importante para el desarrollo de las lagunas, aunque más años de estudio son necesarios para corroborar esta información. Esto puede explicarse por cambios en las características geomorfológicas (embalses naturales formados por depresiones y morrenas) que genera el retroceso glaciar (Haeberli et al., 2016). El desarrollo de un mayor número de nuevas lagunas pequeñas (900–5000 m²), indica que estas pueden encontrarse recién en una fase de desarrollo inicial, creciendo aceleradamente a pesar de la actual disminución de la tasa de reducción glaciar. Esta relación sugiere un tiempo de respuesta atrasado entre el cambio de masa glaciar y la consecutiva formación de lagunas. Conforme va disminuyendo la extensión glaciar descubriendo menor área y aportando menos agua de deshielo en el futuro, el crecimiento de lagunas podría también llegar a un punto de inflexión y luego disminuir. Dado que el aporte pluvial es una de las principales fuentes de alimentación de las lagunas de la Cordillera de Vilcabamba (ANA, 2012a), sería urgente contrastar y analizar la data existente para determinar cambios en los patrones de precipitación y en la línea promedio de cambio a fase sólida y líquida.

Evaluación de parámetros y análisis de la amenaza

Se identificaron 52 lagunas que cumplieron con los criterios críticos establecidos de incremento de superficie, a estas lagunas se las denomina “lagunas indicadores” (Tabla 3). Doce lagunas (con una superficie mínima de 5.4x10³ m² en el 2014) ampliaron su área en un 100% o más

con respecto al área que registraron en 1991, 45 lagunas crecieron en un mínimo de 5.4x10³ m², y se ha formado una nueva laguna en el periodo 2010-2014 con una extensión de 6.3x10³ m². El 17.3% de estas lagunas (9) tienen un tamaño medio (>50.0x10³ m² y <100.0x10³ m²), y el 13.5% son de gran tamaño (>100.0x10³ m²) (Anexo 1).

El análisis de conexión con centros poblados indica que trece de las lagunas indicadores se encuentran vertiente arriba de centros poblados que se ubican en el interior de las potenciales rutas de recorrido de los flujos aluviónicos. Además, dos de estas lagunas representan una potencial amenaza baja-mediana, las lagunas codificadas como B067 y B081; y tres lagunas, una potencial amenaza mediana-alta, las lagunas A038, A162 y B062 (Tabla 3 y Anexo 1).

Las lagunas B067 y B081 fueron clasificadas como lagunas con potencial amenaza baja-mediana por encontrarse dentro de los umbrales medios de incremento de superficie y distancia al glaciar (Tabla 3). La laguna B067 ha crecido en 16,200 m² entre 1991 al 2014, y se ubica a 180 m de distancia al glaciar. De otro lado, la laguna B081 es una nueva laguna formada en el periodo 2001-2010, ha crecido 8108 m², y aún está en contacto con el glaciar. Ambas se encuentran represadas por un dique de lecho rocoso (Anexo 1).

Las lagunas con potencial amenaza mediana-alta son las que superaron el umbral máximo de crecimiento (>20.0x10³ m²), y que además cumplen con uno o más de los otros parámetros críticos de amenaza (Tabla 3). Estas son las lagunas codificadas como A038, A162 y B062 (Anexo 1). La laguna A162 que aún se encuentra en contacto con el glaciar y la laguna B062 (Figura 5) que se ubica a 35 m del glaciar, registraron el mayor incremento de superficie (45.0x10³ m² y 65.7x10³ m², respectivamente). Además, son lagunas relativamente nuevas formadas en el periodo 2001-2010.

Las pendientes registradas en las laderas de los alrededores de las lagunas A162 y B062 son moderadamente a fuertemente inclinadas. Las dos laderas del canal de avalancha de la laguna A162 indican pendientes medianamente a fuertemente inclinadas de 18.6° y 20.6°. Además, se identificaron dos áreas con presencia de agrietamientos que registraron pendientes de 18.7° y 32.7°. La pendiente media del canal de avalancha de la laguna B062 se calculó en 25.5° y la zona donde se visualizan agrietamientos, que es prácticamente en la extensión de toda la ladera, se estimó una pendiente de 25.6°.

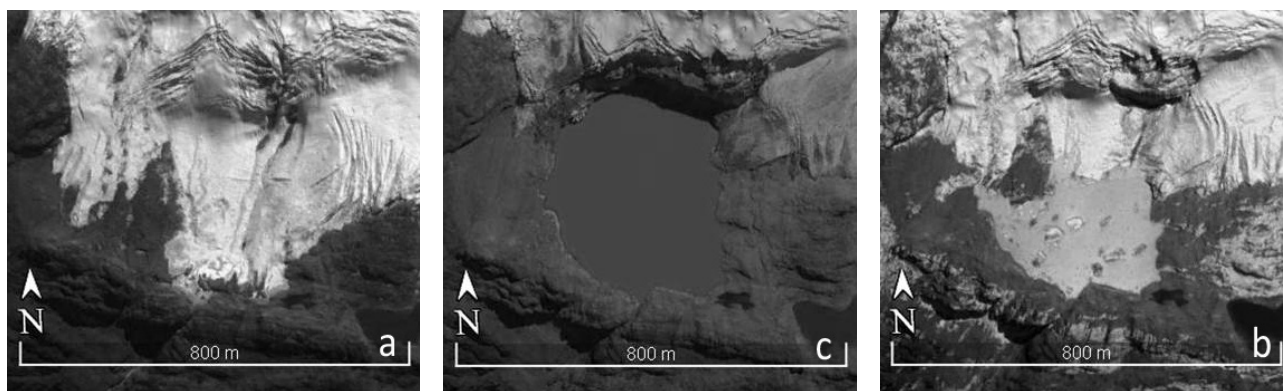


Figura 5. Formación y expansión de la laguna B062 y retroceso de la lengua sureste del glaciar Sacsarayoc. (a) 2007 (b) 2011 (c) 2014. Fuente de las imágenes: Digital Globe (a y b) y Astrium (c), Google Earth Pro.

El cálculo de profundidad según la metodología de Haeberli y Schweizer (1988) se aplicó a la laguna A038, ubicada en la lengua norte del nevado Sacsarayoc. Las profundidades (volúmenes) mínima y máxima obtenidas para la laguna A038 fueron de unos 42 m ($7.1 \times 10^6 \text{ m}^3$) y 102 m ($17.2 \times 10^6 \text{ m}^3$). Contrastando estos resultados con la metodología de Huggel et al. (2002), se evidencia una amplia diferencia con una profundidad (volumen) de 16 m ($2.7 \times 10^6 \text{ m}^3$). Cabe destacar que los resultados presentados brindan una dimensión de la profundidad y volumen sin determinar valores con mayor precisión. Dentro y entre los métodos de parametrización de profundidad (Haeberli y Schweizer, 1988) y del escalado de área-profundidad (Huggel et al., 2002) existe una variabilidad de resultados considerable. Sobre todo el método de Huggel et al. (2002) brinda una aproximación rápida y eficaz para determinar la profundidad y el volumen, pero al mismo tiempo muestra un alto grado de incertidumbre (Cook y Quincey, 2015). En este contexto se debe mencionar que hasta la actualidad no existen mejores métodos de determinación de estas variables a excepción de los directos (p. ej. batimetría).

La laguna A038 también ha tenido un incremento de área por encima de los $20.0 \times 10^3 \text{ m}^2$. Si bien se encuentra a un poco más de 1 km de distancia del glaciar, la lengua glaciar ofrece un embalse natural propicio para seguir reteniendo agua proveniente del deshielo del Sacsarayoc o de precipitaciones. Además, los canales de avalancha de las laderas en torno a esta laguna presentan pendientes ligeras a medianamente inclinadas, con valores de 14.8° , 18.0° y 17.3° . Adicionalmente, se identificaron cuatro zonas con presencia de agrietamientos. Las pendientes de estas zonas indican 28.9° , 19.6° , 23.1° y 23.1° .

La laguna Sisaypampa, donde se originó el GLOF de 1996, ha tenido un crecimiento poco significativo ($2.7 \times 10^3 \text{ m}^2$). La laguna Hampi K'ocha, con una superficie constante de unos $103.5 \times 10^3 \text{ m}^2$ entre 1991 y 2014, es la más grande y peligrosa de la cuenca del Sacsara de acuerdo al estudio de Giráldez et al. (2012). Frey et al. (2016) señalan que tampoco se espera que esta laguna presente cambios significativos en su superficie a futuro. De acuerdo a los parámetros considerados, estas lagunas se categorizaron como de amenaza baja.

Estos parámetros muestran que 277 de las 329 lagunas representan una amenaza menor. Son lagunas en su mayoría pequeñas, recientemente formadas o que no han cambiado significativamente en el tiempo. Asimismo, se detectaron 52 lagunas que pueden implicar un mayor grado

de amenaza por haber evidenciado un cambio más notorio. Por ello, es necesario que estas lagunas sean estudiadas y monitoreadas. Las lagunas identificadas como las de mayor amenaza son la B062, A162 y A038 (Tabla 5). Su acelerado crecimiento en conjunto con otros factores como la proximidad al glaciar y relativa reciente formación en el caso de las dos primeras lagunas, el tipo de dique morrénico y gran volumen de agua (mínimamente superior a los $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3$) en el caso de la laguna A038 generan las condiciones para un posible desembalse. Además, en las tres lagunas se identificaron pendientes críticas que sobrepasan los umbrales de 11° en el canal de avalancha (glaciar-laguna) y de los 20° en las zonas de agrietamientos susceptibles a caídas de rocas y/o desprendimiento glaciar.

Es importante remarcar que la aplicación de una metodología semiautomática basada principalmente en el incremento de la superficie, discriminó lagunas como Sisaypampa y Hampi K'ocha que mantuvieron una superficie relativamente estable, pero que por tener otras características combinadas de pendiente, proximidad al glaciar, tipo de dique, volumen, entre otros, representan un potencial de amenaza mayor. En este contexto también se debe señalar que el uso del cambio de área lagunar como primer indicador de amenaza es discutible, ya que esta alteración en sí no necesariamente representa una amenaza intrínseca. En nuestro modelo lo comprendemos más como un primer indicador detectable de manera extensa y eficaz sobre múltiples lagunas, vinculado al derretimiento glaciar y al aumento de niveles de amenaza que conllevarían algunos cambios geomorfológicos en los glaciares, lagunas y respectivas laderas. Sin embargo, se debe considerar más parámetros en combinación, los cuales, además, requieren un mayor análisis y edición manual o un trabajo de campo.

Poblaciones expuestas a un GLOF en la Cordillera de Vilcabamba

La identificación de centros poblados expuestos a un GLOF es crucial para concentrar esfuerzos en lagunas priorizadas y tomar acciones para mitigar o evitar el impacto de este evento.

Se determinó que existen 15 centros poblados que se encuentran pendiente abajo de lagunas indicadores, de los cuales 10 tienen algún nivel de conexión con lagunas que representan una potencial amenaza baja-mediana y/o mediana-alta (Tabla 5 y Figura 6). Además, los resultados de modelamientos de flujos aluviónicos de $5.0\text{-}10.0 \times 10^6$

m³ realizados en las microcuencas del Salcantay, Sacsara y Aobamba (Buis, 2014), señalan a tres de estos centros poblados (Andihuela, Huadquiña y Sauce Pampa) como peligrosamente expuestos. El modelamiento indica que el nuevo poblado de Santa Teresa se encuentra comparativamente más seguro que Huadquiña y Sauce Pampa; sin embargo, la amenaza potencial persiste debido a posibles errores del DEM y otros errores adicionales.

Las lagunas B062, A162 y A038 (amenaza mediana-alta) pueden implicar una amenaza significativa para las poblaciones de Hornopampa, Yanama, Yanatile, Versalles, Huadquiña, Sauce Pampa, Santa Teresa y Ccantopata. Si bien de acuerdo al estudio de Buis (2014), la nueva población de Yanatile fue reconstruida fuera de la zona de mayor amenaza (Figura 6).

Centro poblado	Localización		Lagunas que representan amenaza
	Oeste	Sur	
Hornopampa	13°19'27"	72°49'36"	B010, B062, B067
Yanama	13°19'19"	72°50'48"	B010, B062, B067
Ccantopata	13°05'06"	72°52'02"	A038
Yanatile	13°10'29"	72°38'09"	A030, A041, A051, A124 y A162
Versalles	13°10'22"	72°37'55"	A030, A041, A051, A124 y A162
Andihuela	13°09'08"	72°37'52"	A030, A041, A051, A124 y A162
Huadquiña	13°07'59"	72°35'52"	A030, A041, A051, A124 y A162
Santa Teresa	13°07'48"	72°35'40"	A030, A041, A051, A124 y A162
Sauce Pampa	13°08'18"	72°35'44"	A030, A041, A051, A124 y A162
Sauceda	13°29'10"	72°30'18"	A078, B011, B013
Soray	13°22'43"	72°34'06"	A078, B011, B013
Ancascocha	13°29'57"	72°30'10"	A078, B011, B013
Ahuaccata	13°28'57"	72°30'03"	A078, B011, B013
Chongaña	13°17'55"	72°51'55"	B081
Mescay	13°13'56"	72°25'02"	A106

Tabla 5: Centros poblados expuestos a lagunas con potencial amenaza media-alta y muy alta. En la Figura 6 se visualiza en mayor detalle a estos centros poblados y a las lagunas que representan una amenaza.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El siguiente estudio revela el desarrollo acelerado de lagunas glaciares en un ambiente crecientemente propenso a la formación de nuevas lagunas. Este hallazgo es particularmente interesante dado que se presenta a pesar de contar con una ligera disminución en la tasa de retroceso de área glaciar y una aparente desaceleración en el aumento de la temperatura superficial durante las últimas dos décadas en esta región de alta montaña (Vuille et al., 2015). Además, el desarrollo de nuevas lagunas y crecimiento de lagunas existentes tiene serias implicancias para la futura gestión (integrada) de los recursos hídricos en la región que está caracterizada por fuertes cambios hidroclimáticos y socioeconómicos (Drenkhan, 2016). En este contexto, nuevos reservorios de agua constituyen una oportunidad de uso hídrico para, entre otros, el sector doméstico, agrícola e hidroeléctrico, pero al mismo tiempo un alto potencial de conflicto entre los múltiples usuarios de agua (Drenkhan et al., 2015).

Nuestros resultados sobre nuevas lagunas formadas indican un mayor desarrollo en el rango altitudinal de 4400 a 4800 msnm lo cual sugiere asumir que el derretimiento glaciar ha sido una de las principales fuentes de alimentación de estas lagunas al formarse próximas a la zona límite actual de los glaciares o en depresiones recientemente descubiertas de hielo. Una pregunta de investigación por trabajar en más detalle en próximos estudios sería corroborar la tasa de formación de nuevas lagunas glaciares y crecimiento de espejos de agua existentes mediante más estudios para identificar en mayor detalle la relación entre el cambio en factores climáticos, topografía, derretimiento glaciar y formación de lagunas en ésta y otras cordilleras de los Andes.

El modelo semiautomático presentado en combinación con técnicas de parametrización basada en valores empíricos, representa una manera eficaz y robusta para hallar datos de áreas aproximadas y una dimensión de volúmenes en regiones extensas e inaccesibles de forma sistemática, y de esta manera estimar la magnitud del

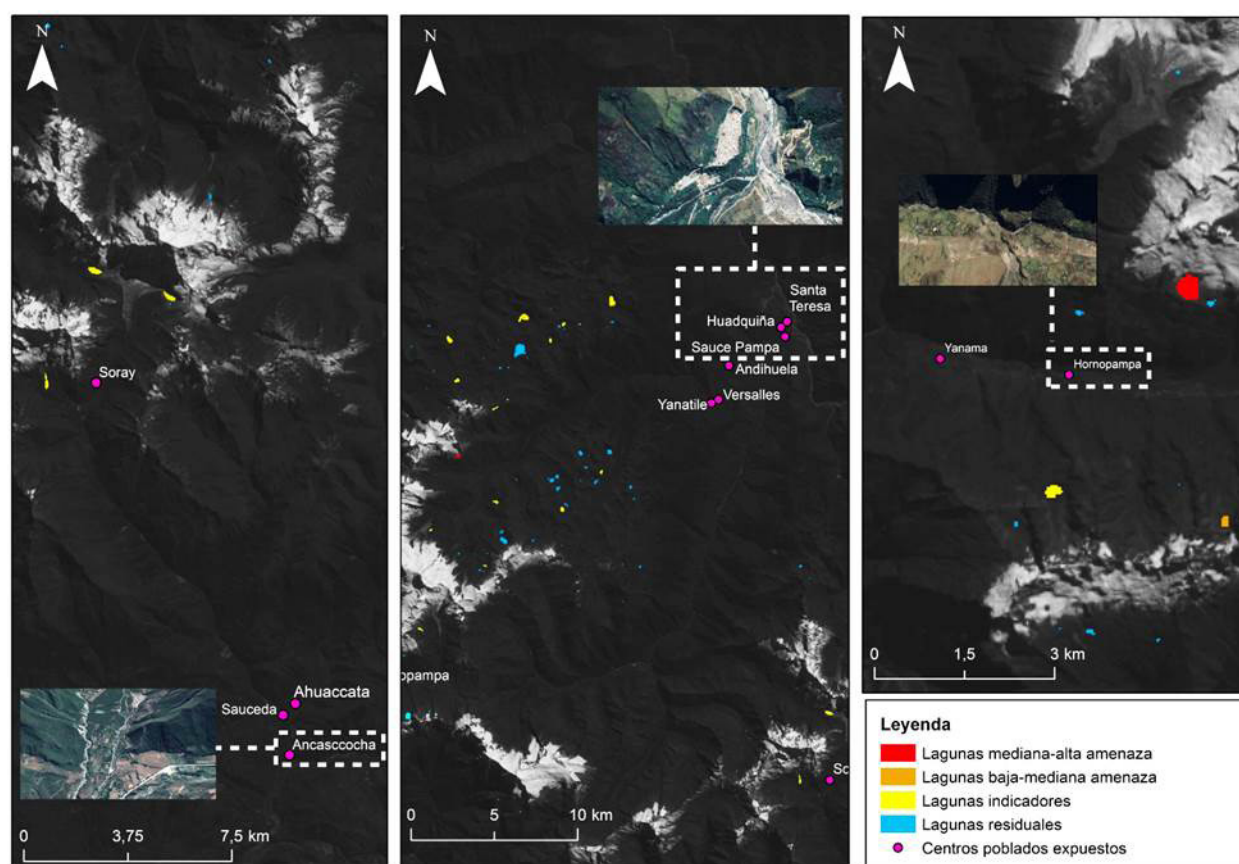


Figura 6. Visualización de centros poblados expuestos. La imagen base empleada corresponde a la banda 3 de Landsat 8 OLI del 29.05.2014.

problema. Hasta la actualidad no existen formas de mayor precisión para determinar el volumen lagunar sin aplicar métodos directos de batimetría que involucran mucho más esfuerzo y tiempo.

Limitantes en este estudio radican en el tratamiento digital de las imágenes satelitales, selección de umbrales de NDSI y NDWI, ediciones manuales y definición de parámetros de amenaza. Aunque en las imágenes de Landsat los glaciares y lagunas no representan objetos muy sensibles que presentan fuertes cambios de reflectancia según método de corrección, se podría considerar una corrección radiométrica a fin de homogeneizar mejor los valores de NDSI y NDWI. Las imágenes de Sentinel (10 m, 16 bit), ASTER (15 m, 12 bit) y SRTM (30 m, 16 bit, todavía con vacíos) libremente accesibles desde el 2015/2016, representan un nuevo hito para mejorar la calidad de futuros resultados de un estudio como éste. Adicionalmente, nuevos estudios podrían incorporar iteraciones basadas en trabajo de campo y protocolos (inter)nacionales para ajustar los umbrales de amenaza de las lagunas glaciares y proponer una metodología de definición de riesgo incorporando más variables de exposición y vulnerabilidad de la población local.

Hasta la actualidad faltan estudios sistemáticos con protocolos estandarizados para determinar la amenaza de lagunas glaciares y potencial de riesgo en la zona con los parámetros correspondientes. Además, para poder comprender en más detalle cambios en los factores climáticos a largo plazo y su posible impacto en la morfología (peri)glaciar, el desarrollo de las lagunas glaciares y cambios en las condiciones de amenaza, se debe contar con una mayor red de monitoreo meteorológica,

glaciar y geomorfológica. Actualmente, no existe una red de monitoreo glaciar y sísmico sistemático ni en la Cordillera de Vilcabamba, ni en otras cordilleras vecinas (Hoffmann y Weggenmann, 2013).

La UGRH ha iniciado mediciones sistemáticas de batimetría en lagunas de la Cordillera Blanca, Ancash, para hallar estadísticas de (cambios en) la profundidad y volumen de principales lagunas glaciares. Este monitoreo debe ser ampliado a las otras cordilleras. En este contexto se debe mencionar los bajos recursos que tradicionalmente el Gobierno ha asignado a los Gobiernos Regionales/Locales y la ANA/UGRH para poder presupuestar medidas concretas de Reducción del Riesgo de Desastres (RRD) y fomentar conciencia y oportunidades de adaptación a las nuevas condiciones adversas en la población local. La coyuntura actual positiva en el país y la región, mediante la creación del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) perteneciente al Ministerio del Ambiente (MINAM) así como una nueva Unidad de Glaciología en Cusco a través de la Plataforma de Glaciología en este año, podrían ayudar a promover el monitoreo sistemático de lagunas señaladas en este y otros estudios. Para ello será netamente importante articular y coordinar estrechamente entre las diferentes instituciones los múltiples estudios, campañas y toma de decisiones.

AGRADECIMIENTOS

El estudio ha sido desarrollado en el marco de una tesis de licenciatura de Geografía (PUCP, Lima) y del Proyecto Glaciares+. Los autores agradecen la detenida revisión del manuscrito por Wilfried Haeberli y los valiosos comentarios

de Christian Huggel y Holger Frey (Universidad de Zúrich). Los autores también agradecen los comentarios de un revisor anónimo y datos proporcionados por Wilson Suarez (SENAMHI, Lima), Alejo Cochachin (UGRH, Huaraz) y Virginia Ruiz-Villanueva (Universidad de Ginebra).

REFERENCIAS

- ANA. (2012a). *Inventario de lagunas de las cordilleras Apolobamba / La Raya / Vilcabamba / Volcánica / Urubamba*.
- . (2012b). *Inventario nacional de glaciares de las cordilleras Apolobamba, La Raya, Vilcabamba, Volcánica y Urubamba*.
- . (2014). *Inventario nacional de glaciares y lagunas*.
- Bajracharya, S. y Mool, P. (2009). Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Annals of Glaciology*, 50 (53), 81–86. doi:10.3189/172756410790595895
- Bolch, T., Peters, J., Yegorov, A., Pradhan, B., Buchroithner, M. y Blagoveshchensky, V. (2012). Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tian Shan. En Pradhan, B. y Buchroithner, M. (Eds.). *Terrigenous mass movements: detection, modelling, early warning and mitigation using geoinformation technology*, 369–98. Heidelberg, Springer-Verlag Berlin. doi:10.1007/978-3-642-25495-6_12
- Booth, J. E. y Punt, L. J. (2012). Analysis of glacial lake outburst flood triggering mechanisms for the Imja Tsho glacial lake and potential effects on the downstream morphology of the stream channel. *Trail Six: An Undergraduate Journal of Geography*, 6, 81–90.
- Buis, D. (2014). *Trigger analysis and modelling of very large debris flows in Santa Teresa, Cusco, southern Peru*. Tesis de maestría. Department of Geography, University of Zurich, Zurich.
- Carey, M. (2010). *In the shadow of melting glaciers: Climate change and Andean society*. Oxford, Oxford University Press.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., Romero, D., Valdivia, W. y Tintaya, D. (1999). *Geología de los cuadrángulos de Quillabamba y Machupicchu. Hojas 26-Q y 27-Q*. Boletín 127, Serie A: Carta Geológica Nacional. Lima, INGEMMET (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico).
- Cook, S. y Quincey, D. (2015). Estimating the volume of alpine glacial lakes. *Earth Surface Dynamics*, 3, 559–575. doi:10.5194/esurf-3-559-2015
- Drenkhan, F. (2016). En la sombra del cambio climático: Hacia una gestión integrada y adaptativa de recursos hídricos en los Andes del Perú. *Espacio y Desarrollo*, 28, 25–51. <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/15003>
- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J. y Oré, M. (2015). The changing water cycle: climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(6), 715–733. <https://doi.org/10.1002/wat2.1105>
- Frey, H., Huggel, C., Bühler, Y., Buis, D., Burga, M., Choquevilca, W.,... Walser, M. (2016). A robust debris-flow and GLOF risk management strategy for a data-scarce catchment in Santa Teresa, Peru. *Landslides*, March 2015, 1–15. doi:10.1007/s10346-015-0669-z
- Frey, H., Huggel, C., Paul, F. y Haeberli, W. (2010). Automated detection of glacier lakes based on remote sensing in view of assessing associated hazard potentials. En Kaufmann, V. y Sulzer, W. (Eds.). *Proceedings of the 10th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Kathmandu*. Grazer Schriften der Geografie und Raumforschung 45, 261–272.
- Giráldez, C., Cusipaucar, F., Farfán, N., Puma, R., Quispe, A., Barra, J.-C.,... Lozono, G. (2012). Proyecto “Glaciares”. Informe de la expedición a la quebrada Sacsara del 9 al 12 de noviembre 2012. Reporte interno del Proyecto.
- Haeberli, W., Huggel, C., Paul, F. y Zemp, M. (2013). Glacial responses to climate change. En Shroder, J. (Ed.). *Treatise on Geomorphology*, 13, 152–175. San Diego, Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-374739-6.00350-X
- Haeberli, W. y Schweizer, J. (1988). Rhonegletscher 1850: Eismechanische Ueberlegungen zu einem historischen Gletscherstand. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zurich*, 94, 59–70.
- Haeberli, W., Schaub, Y. y Huggel, C. (2016a). Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology*. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.geomorph.2016.02.009
- Haeberli, W., Cochachin, A., Fischer, U., Giráldez, C., Linsbauer, A. y Salazar, C. (2016b). On the morphological characteristics of overdeepenings in high-mountain glacier beds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 1980–1990. doi:10.1002/esp.3966
- Hanshaw, M. N. y Bookhagen, B. (2014). Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: Status of the Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru. *The Cryosphere*, 8(2), 359–76. doi:10.5194/tc-8-359-2014
- Harrison, S., Glasser, N., Winchester, V., Haresign, E., Warren, C. y Jansson, K. (2006). A glacial lake outburst flood associated with recent mountain glacier retreat, Patagonian Andes. *The Holocene*, 16(4), 611–20. doi:10.1191/0959683606hl957rr
- Hegglin, E. y Huggel, C. (2008). An integrated assessment of vulnerability to glacial hazards. *Mountain Research and Development*, 28(3), 299–309.


doi:10.1659/mrd.0976

- Hoffmann, D. y Weggenmann, D. (2013). Climate change induced glacier retreat and risk management: Glacial lake outburst floods (GLOFs) in the Apolobamba mountain range, Bolivia. *En Leal Filho, W. (Ed.). Climate Change and Disaster Risk Management*, 71-87. doi: 10.1007/978-3-642-31110-9_5
- Huggel, C., Kääb, A. y Haeberli, W. (2003). *Vulnerability study of the central hidroelectrica Machupicchu - glacial hazard assessment and modelling based on satellite imagery*. Final Report. Department of Geography, University of Zurich.
- Huggel, C., Kääb, A., Haeberli, W., Teyssier, P. y Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 316–330. doi:10.1139/t01-099
- INGEMMET. (1999). *Estudio glaciológico de la cuenca del río Aobamba*. Informe técnico. Lima, Dirección de Geotecnia, Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Jain, S., Lohani, A., Singh, R., Chaudhary, A. y Thakural, L. (2012). Glacial lakes and glacial lake outburst flood in a Himalayan basin using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*, 62(3), 887–899. doi:10.1007/s11069-012-0120-x
- Kaser, G. y Osmaston, H. (Eds.). (2002). *Tropical glaciers*. Cambridge, Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- MAXIMIZE Consult S.A. (2011). Diagnóstico de línea base Santa Teresa. Cusco. Proyecto PRAA.
- Mergili, M., Kopf, C., Müllebnner, B. y Schneider, J. F. (2012). Changes of the cryosphere and related geohazards in the high-mountain areas of Tajikistan and Austria: A comparison. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 94(1), 79–96. doi:10.1111/j.1468-0459.2011.00450.x
- NASA. (2016). Technical details [Landsat images]. http://landsat.gsfc.nasa.gov/?page_id=2290
- PNUD. (2013). *Informe sobre desarrollo humano Perú 2013. Cambio climático y territorio: Desafíos y respuestas para un futuro sostenible*. Lima, PNUD.
- Portocarrero, C. (2014). *The glacial lake handbook; Reducing risk from dangerous glacial lakes in the Cordillera Blanca, Peru*. Washington, D.C., USAID. http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pbaaa087.pdf
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L.,... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81–102. doi:10.5194/tc-7-81-2013
- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P. y Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *The Cryosphere*, 7(1), 103–118. doi:10.5194/tc-7-103-2013
- Silverio, W. y Jaquet, J.-M. (2005). Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 342–50. doi:10.1016/j.rse.2004.12.012
- Suarez, W., Cerna, M., Ordóñez, J., Frey, H., Giráldez, C. y Huggel, C. (2013). Monitoring glacier variations in the Urubamba and Vilcabamba mountain ranges, Peru, using “Landsat 5” images. *Geophysical Research Abstracts*, 15, EGU2013-8182.
- USGS. (2013). NASA shuttle radar topography mission (SRTM) version 3.0 (SRTM Plus) product release. https://lpdaac.usgs.gov/about/news_archive/nasa_shuttle_radar_topography_mission_srtm_version_30_srtm_plus_product_release
- Vuille, M., Kaser, G. y Juen, I. (2008a). Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global and Planetary Change*, 62 (1-2), 14–28. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.11.003
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G. y Bradley, R. S. (2008b). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4), 79–96. doi:10.1016/j.earscirev.2008.04.002
- Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R., Sven, W., Casimiro, L. y Cáceres, B. (2015). Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 120(9), 3745-3757. doi:10.1002/2015JD023126
- Wegner, S. (2014). *Lo que el agua se llevó: Consecuencias y lecciones del aluvión de Huaraz de 1941*. Nota Técnica 7 de la serie “Notas Técnicas sobre Cambio Climático”. Lima, Ministerio del Ambiente.
- Worni, R., Huggel, C. y Stoffel, M. (2012). Glacial lakes in the Indian Himalayas - From an area-wide glacial lake inventory to on-site and modeling based risk assessment of critical glacial lakes. *Science of the Total Environment*, 468-469. Elsevier B.V.: S71–84. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.11.043.

Anexo 1. Caracterización de lagunas indicadores, con potencial amenaza baja-mediana y mediana-alta.

Código	Localización		Tipo de dique	Área promedio por año				Crecimiento promedio (1991-2014)		Distancia al glaciar
	Oeste	Sur		1991	2001	2010	2014	Relativo	Absoluto	
				10 ³ m ²	10 ³ m ²	10 ³ m ²	10 ³ m ²	%	10 ³ m ²	
A002	13°07'12"	72°41'30"	Rocoso	138.6	140.4	145.8	156.6	13	18.0	9.8
A004	13°07'43"	72°44'26"	Rocoso	145.8	143.1	152.1	163.8	12	18.0	5.5
A005	13°07'57"	72°43'06"	Rocoso	30.6	31.5	36.0	36.0	18	5.4	6.8
A006	13°07'57"	72°42'33"	Rocoso	2.7	4.5	4.5	6.3	133	3.6	7.6
A008	13°08'31"	72°46'53"	Rocoso	82.8	85.5	87.3	90.0	9	7.2	3.4
A009	13°08'29"	72°43'31"	Rocoso	27.9	28.8	30.6	33.3	19	5.4	5.6
A017	13°09'04"	72°48'44"	Rocoso	2.7	3.6	4.5	5.4	100	2.7	4.0
A021	13°09'50"	72°46'40"	Rocoso	44.1	45.0	50.4	54.0	22	9.9	1.1
A030	13°10'43"	72°45'21"	Rocoso	22.5	23.4	22.5	27.9	24	5.4	0.7
A034	13°11'58"	72°56'06"	Rocoso	39.6	39.6	39.6	45.0	14	5.4	2.7
A038	13°12'28"	72°49'07"	Morrénico	139.5	145.8	166.5	168.3	21	28.8	1.2
A041	13°12'45"	72°41'47"	Rocoso	22.5	27.9	27.0	28.8	28	6.3	5.3
A051	13°13'47"	72°45'15"	Rocoso	34.2	35.1	36.9	40.5	18	6.3	2.7
A055	13°13'59"	72°43'04"	Rocoso	46.8	48.6	53.1	53.1	13	6.3	2.2
A060	13°14'42"	72°47'27"	Morrénico	9.0	12.6	13.5	16.2	80	7.2	3.1
A068	13°15'50"	72°45'40"	Morrénico	9.9	10.8	13.5	15.3	55	5.4	0.6
A077	13°19'49"	72°21'52"	Morrénico	30.6	30.6	27.9	39.6	29	9.0	1.5
A078	13°20'32"	72°34'09"	Morrénico	70.2	63.0	74.7	76.5	9	6.3	1.1
A082	13°09'54"	73°02'07"	Rocoso	37.8	42.3	42.3	44.1	17	6.3	1.8
A085	13°10'38"	73°02'40"	Rocoso	3.6	3.6	5.4	7.2	100	3.6	1.1
A106	13°17'36"	72°23'32"	Rocoso	0.0	0.0	18.9	25.2	33	6.3	0.0
A108	13°18'06"	72°24'01"	Rocoso	0.0	1.8	7.2	7.2	300	5.4	0.3
A110	13°18'02"	72°22'01"	Morrénico	34.2	42.3	45.1	45.9	34	11.7	0.5
A124	13°10'26"	72°44'57"	Rocoso	3.6	4.5	7.2	7.2	100	3.6	1.6
A145	13°09'42"	72°54'10"	Rocoso	3.6	7.2	7.2	7.2	100	3.6	5.7
A149	13°13'08"	72°53'52"	Rocoso	38.7	45.0	45.0	46.8	21	8.1	1.6
A158	13°09'17"	72°51'33"	Rocoso	49.5	49.5	54.0	54.9	11	5.4	3.7
A162	13°12'15"	72°46'33"	Rocoso	0.0	0.0	29.7	45.0	52	45.0	0.0
A166	13°15'21"	72°30'11"	Rocoso	18.0	19.8	20.7	27.0	50	9.0	0.9
B007	13°17'54"	72°47'48"	Mixto	19.8	19.8	29.7	29.7	50	9.9	2.2
B010	13°20'30"	72°49'44"	Rocoso	37.8	38.7	43.2	44.1	17	6.3	1.3

Código	Localización		Tipo de dique	Área promedio por año				Crecimiento promedio (1991-2014)		Distancia al glaciar
	Oeste	Sur		1991 10 ³ m ²	2001 10 ³ m ²	2010 10 ³ m ²	2014 10 ³ m ²	Relativo %	Absoluto 10 ³ m ²	
B011	13°21'04"	72°32'35"	Morrénico	0.0	41.4	59.4	61.2	48	19.8	0.8
B013	13°22'43"	72°35'05"	Morrénico	29.7	30.6	42.3	44.1	48	14.4	1.1
B017	13°34'31"	72°53'16"	Morrénico	52.2	51.3	54.9	57.6	10	5.4	3.3
B026	13°21'06"	73°06'05"	Rocoso	16.2	18.0	19.8	21.6	33	5.4	4.9
B028	13°20'45"	73°02'19"	Rocoso	90.0	103.5	99.9	101.7	13	11.7	1.0
B029	13°20'49"	73°06'43"	Rocoso	3.6	5.4	5.4	7.2	100	3.6	5.8
B035	13°33'37"	72°55'10"	Mixto	0.0	0.0	0.0	6.3		6.3	0.5
B062	13°18'39"	72°48'31"	Rocoso	0.0	0.0	46.8	112.5	140	65.7	3.5
B067	13°20'46"	72°48'09"	Mixto	4.5	24.3	20.7	20.7	360	16.2	0.2
B081	13°16'54"	72°51'35"	Rocoso	0.0	0.0	14.4	22.5	56	8.1	0.2
C001	13°08'12"	73°05'46"	Mixto	238.5	223.2	250.2	252.9	6	14.4	7.2
C003	13°08'33"	73°04'32"	Rocoso	1.8	7.2	7.2	7.2	300	5.4	5.9
C004	13°09'04"	73°07'57"	Rocoso	4.5	3.6	6.3	9.0	100	4.5	7.5
C015	13°12'39"	73°08'38"	Rocoso	85.5	94.5	94.5	93.6	9	8.1	2.2
C016	13°13'18"	73°11'19"	Rocoso	45.0	48.6	50.4	50.4	12	5.4	2.2
C018	13°13'32"	73°08'28"	Rocoso	2.7	2.7	3.6	6.3	133	3.6	1.8
C020	13°13'36"	73°08'37"	Rocoso	94.5	100.8	102.6	107.1	13	12.6	2.1
C023	13°14'44"	73°12'25"	Rocoso	35.1	37.8	40.5	41.4	18	6.3	2.1
C024	13°16'16"	73°09'05"	Rocoso	33.3	34.2	36.9	38.7	16	5.4	4.0
C035	13°14'34"	73°06'17"	Mixto	6.3	11.7	11.7	11.7	86	5.4	0.8
C041	13°14'32"	73°11'19"	Rocoso	11.7	11.7	17.1	17.1	46	5.4	2.9

 Lagunas baja-mediana amenaza

 Lagunas mediana-alta amenaza